

Bürklein M, Vogt L, Banzer W

## Messverfahren zur Erfassung der Herzfrequenzvariabilität – Eine vergleichende Studie

### *Cross validation of heart rate variability measurements before and after exercise*

Abteilung Sportmedizin, Institut für Sportwissenschaften Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt/Main

#### Zusammenfassung

Aufgrund der Vielfalt der in der internationalen Forschung eingesetzten Messinstrumentarien und Auswerteroutinen ist bislang kein einheitlicher Standard der HRV-Analyse erreicht. Ziel dieser Studie ist die Kreuzvalidierung etablierter Erhebungs- und Analysemethoden der HRV in unterschiedlichen Belastungssituationen.

Bei 17 Probanden (19–41 Jahre) erfolgten simultane HRV-Kurzzeitaufzeichnungen mit den Messsystemen VarCor PF5® und Polar S810® vor und nach standardisierter Ausdauerbelastung. Die Auswertung erfolgte im Zeit- (RRinter, SDNN, RMSSD) und Frequenzbereich (LF, HF, TP, LF/HF-Ratio). Die spektralanalytischen Ergebnisse beider Messsysteme wurden mit den Leistungsdichtespektren einer den Richtlinien der Task Force of the European Society of Cardiology (1996) entsprechenden Software verglichen.

Die Ergebnisse zeigen hohe lineare Zusammenhänge zwischen VarCor® und Polar® für die Parameter des Zeitbereichs vor und nach Belastung ( $r = 0,822-0,998$ ,  $p < 0,01$ ). Im Vergleich zur Referenzsoftware HRV Analysis 1.1 zeigten die spektralen Verteilungsmesswerte von VarCor® und Polar® in Abhängigkeit der Trendeliminierung niedrige bis hohe Korrelationen.

Die Ergebnisse belegen den hohen Übereinstimmungsgrad zeitbezogener Messergebnisse von HRV-Kurzzeitregistrierungen, weisen aber gleichzeitig die Existenz system- und auswertespezifischer Unterschiede für das Leistungsdichtespektrum nach. Die Vereinheitlichung der Analyseverfahren nach den Richtlinien der Task Force (37) sollte im Mittelpunkt weiterer multidisziplinärer Bemühungen stehen.

**Schlüsselwörter:** Herzfrequenzvariabilität, Validierung, Messverfahren, Frequenzanalyse, Zeitbereichsanalyse

#### Einleitung

Seit ihrer erstmaligen Beschreibung im Rahmen der pränatalen Diagnostik (12) hat sich die Herzfrequenzvariabilität (HRV) nicht nur als diagnostischer Parameter und Risikomarker in zahlreichen medizinischen Fachrichtungen etabliert (4, 11, 19, 21, 24, 29, 33, 38), sondern gewinnt auch im Bereich der Sportwissenschaften und Sportmedizin zunehmend an Bedeutung. Dennoch ist die Aussagekraft und praktische Anwendbarkeit der HRV-Analyse im Rahmen sportmedizinischer Fragestellungen noch immer Inhalt wissenschaftlicher Diskussionen. Einerseits ist die hohe intraindividuelle Variabilität (37) durch diverse en-

#### Summary

Due to the variety of measuring systems and evaluation routines used by international researchers no uniform standards for HRV analysis have been achieved so far. The purpose of this study was the cross validation of common procedures used for short-time HRV analysis.

Time (RRinter, SDNN, RMSSD) and frequency (LF, HF, TP, LF/HF-Ratio) domain parameters were calculated from simultaneous HRV measurements by VarCor PF5® and S810 Polar® before and after a standardized endurance test in 17 healthy subjects (19–41 years). The calculated power spectrums were compared against the results of a customized software application (HRV Analysis 1.1, Kuopio, Finland) developed following the Task Force (6) guidelines.

The results demonstrate high linear relationships between VarCor® and Polar® for the time domain parameters before and after exercise ( $r = 0.822-0.998$ ,  $p < 0.01$ ). In comparison with the HRV Analysis Software 1.1, the spectral values of VarCor® and Polar® revealed low to high correlations, depending on the applied detrending method. Using a recent trend removal approach, high linear relationships were evaluated for VarCor® before and after exercise ( $r = 0.888-0.945$ ,  $p < 0.01$ ). The procedure recommended by Bland & Altman (37) demonstrated systematic differences between the examined methods.

The results demonstrate a sufficient level of agreement between time domain measures obtained by short-term HRV analysis. For frequency domain parameters, systemic differences are obvious. Further research should focus on the standardization of HRV analysis procedures by multidisciplinary approaches.

**Key words:** Heart rate variability, validation, measures, software applications

dogene und exogene Störgrößen (20) ursächlich für eine ungenügende Vergleichbarkeit zwischen Personen sowie für eine erschwerte Generierung von Normwerten. Andererseits trägt die Vielfalt der in der internationalen wissenschaftlichen Forschung zur Analyse eingesetzten Untersuchungsprotokolle, Messinstrumentarien und Auswerteroutinen einen wesentlichen Anteil an der bislang unzureichend erfolgten Etablierung der HRV als diagnostisches Instrumentarium in der Sportmedizin. Insbesondere die häufig unzulängliche Datenerfassung (1), die große Anzahl an zum Teil undurchsichtigen mathematischen Algorithmen bzw. frequenzanalytischen Verfahren (18), verschiedene Methoden der Elimination von Artefakten, der Datenfilterung sowie des Resamplings (Abtastrate)

und der zur Analyse herangezogenen Datenmenge (14) erschweren die Interpretation und Vergleichbarkeit der Messergebnisse. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Einsatzes kommerzieller, automatisierter und computer-gestützter Messinstrumente besteht bei der Interpretation der Ergebnisse zusätzlich die Gefahr der unzureichenden Berücksichtigung methodischer Grenzen der HRV-Analyse (1, 14).

Ziel der vorliegenden Studie ist die Kreuzvalidierung derzeit in der internationalen sportmedizinischen Forschung gängiger Erhebungs- und Analysemethoden der HRV. Im einzelnen handelt es sich um die vergleichende Untersuchung von Ergebnissen zweier Messsysteme und dreier Softwareapplikationen vor und nach standardisierter Ausdauerbelastung.

## Methodik

### Probandenkollektiv

An der Studie nahmen 17 gesunde Probanden, 9 Frauen und 8 Männer, mit einem Durchschnittsalter von  $25,8 \pm 4,36$  Jahren (19–41 Jahre) teil. Als Ausschlusskriterien galten koronare Herzerkrankungen, Diabetes mellitus sowie neurologische und psychiatrische Erkrankungen. Weiterhin wurden Raucher sowie Personen, die Medikamente mit dämpfendem Einfluss auf die Herzfrequenz (z.B. Beta-Blocker) einnahmen, nicht berücksichtigt.

Die Probanden wurden angehalten, 12 Stunden vor der Messung weder Alkohol noch koffeinhaltigen Lebensmittel zu konsumieren. Die letzte, leichte Mahlzeit sollte bis zwei Stunden vor der Untersuchung eingenommen werden. Auf starke physische Belastungen war am Tag der Messung ebenso wie am Vorabend zu verzichten.

### Signalaufnahme

Zur Datenerhebung dienten die Messsysteme VarCor PF5® (Fa. Pantalus GmbH) und Polar S810® (Polar Electro GmbH).

Der Rohdateneinzug erfolgt beim Gerät der Fa. Pantalus durch die Verwendung eines mit EKG-Elektroden bestückten Brustgurts in Kombination mit einer Schnittstellenkarte (SGW Interface) und einem handelsüblichen netzunabhängigen Pocket-PC (Handheld compaq iPAQ H3850). Das untersuchte Modell gewährleistet eine kontinuierliche EKG-Registrierung mit einer Abtastrate von 1 kHz und eine Erfassung der RR-Intervalle mit einer Präzision von  $\pm 1$  ms (32). Der Rohdateneinzug wird über die eigens für die HRV-Analyse entwickelte Software für das Betriebssystem Pocket PC 2002 (VarCor PF5® Pocket PC) der Programmiersprache C++ gesteuert. Die auf einem Arbeitsplatzrechner installierte Software VarCor PF5® PC dient im Anschluss an den Datentransfer via Microsoft® Activ Sync zur Auswertung der Zeit- und Frequenzparameter. Die verwendete Spektralanalyse basiert auf dem Algorithmus der Fast-Fourier-Transformation (FFT).

Der Polar S810® ermöglicht die EKG-validierte (maximaler Messfehler: 3 msec, 30) „beat-to-beat“ Registrierung kon-



Abbildung 1: Schematische Darstellung des Untersuchungsablaufes

sekutiver Herzschläge in Ruhe und während körperlicher Aktivität. Die Datenerhebung erfolgt mittels Brustgurtsender und Armbandempfänger. Die aufgezeichneten RR-Intervalle werden mit Hilfe der Software Polar Precision Performance® 4.0 über ein Infrarot Interface vom mobilen Mini-Herzfrequenzmesser zum PC übertragen und stehen dort im ASCII-Format zur weiteren Datenauswertung zur Verfügung. Die Polar-Software bietet eine Auswertung von Zeit- und Frequenzparametern und vollzieht die Frequenzanalyse auf der Grundlage der autoregressiven Korrelation (AR).

### Untersuchungsablauf

Zur simultanen Messung mit den zu vergleichenden Systemen wurden die Brustgurte ventral (VarCor PF5®) und dorsal (Polar S810®) über dem unteren Brustbeindrittel des Thorax befestigt. Während der Messungen lagen die Probanden in Rücklage auf einer Therapieliege. Die Beine lagen flach auf, die Arme ruhten seitlich neben dem Körper.

Tabelle 1: HRV-Parameter des Zeit- und Frequenzbereichs. Modifiziert nach (37)

Variable	Einheit	Statistische Bedeutung
<b>Zeitparameter</b>		
RRinter	ms	Mittlerer Wert aller RR-Intervalle (Zeitabstände von R-Zacke zu R-Zacke)
SDNN	ms	Standardabweichung aller RR-Intervalle (= Gesamtvariabilität)
RMSSD	ms	Quadratwurzel des quadrierten Mittelwertes der Summe aller Differenzen sukzessiver RR-Intervalle
<b>Frequenzparameter</b>		
LF	ms <sup>2</sup>	Leistungsdichtespektrum von 0,04–0,15 Hz
HF	ms <sup>2</sup>	Leistungsdichtespektrum von 0,15–0,40 Hz
TP	ms <sup>2</sup>	Gesamtleistungsdichtespektrum Varianz aller RR-Intervalle $\leq 0,40$ Hz
LF/HF		Verhältnis von Sympathikus zu Parasympathikus

Im Vorfeld der HRV-Messungen erfolgten 5-minütige Ruhephasen, die der Adaptation an die Umgebungsbedingungen und der psychophysischen Entspannung der Probanden dienten. Anschließend wurde bei simultanem Start beider Messsysteme mit der Aufzeichnung der HRV über einen Zeitraum von 5 Minuten begonnen (Ruhemessung 1). Nachfolgend absolvierten alle Probanden einen standardisierten Ausdauer-Feldtests über 12 Minuten (Cooper-Test). Unmittelbar nach Beendigung der Bewegungsintervention erfolgte eine zweite 5-minütige Messung in Ruhe. Sämtliche Messungen wurden von einem Untersucher standardisiert unter konstanten Temperatur- (22–24°C) und Lichtverhältnissen in geräuscharmer Umgebung durchgeführt. Während des Dateneinzugs befanden sich mit Ausnahme des Probanden kei-

Tabelle 2: Mittelwerte (MW), Standardabweichungen (SD), Korrelationskoeffizienten (\*\* = p < 0,01) und Mittelwertsunterschiede der Zeitparameter vor und nach Belastung

	VarCor PF5®		Polar S810®		RK Spearman	Wilcoxon
	MW	SD	MW	SD		
<b>vor Belastung</b>						
RRinter [ms]	961,41 ± 119,48		963,35 ± 120,11		r = 0,998**	n.s.
SDNN [ms]	83,70 ± 32,75		82,49 ± 32,86		r = 0,986**	n.s.
RMSSD [ms]	71,44 ± 47,30		68,28 ± 33,20		r = 0,870**	n.s.
<b>nach Belastung</b>						
RRinter [ms]	653,41 ± 73,93		650,41 ± 74,01		r = 0,997**	p < 0,05
SDNN [ms]	24,29 ± 11,54		24,11 ± 11,69		r = 0,886**	n.s.
RMSSD [ms]	11,15 ± 8,12		25,10 ± 4,84		r = 0,822**	p < 0,01

ne weiteren Personen im Untersuchungsraum. Eine schematische Darstellung des Untersuchungsablaufes geht aus Abbildung 1 hervor.

### Datenanalyse

In Anlehnung an die Empfehlungen der Task Force of the European Society of Cardiology (37) wurden zur HRV-Analyse lediglich Kurzzeit-Aufzeichnungen ausgewählt, welche weniger als 5 % Artefakte aufwiesen. Aus allen 5-minütigen HRV-Messungen wurden für beide Messsysteme annähernd identische Sequenzen von 256 RR-Intervallen zur Datenanalyse ausgewählt. Die Artefaktkontrolle und -bereinigung erfolgte manuell blickdiagnostisch über softwareintegrierte Fensterfunktionen (VarCor PF5®) bzw. halbautomatisiert (Polar S810®) unter Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms. Von der Datenauswertung ausgeschlossen wurden alle um mehr als 30 % von einem gleitenden Referenzwert (5-Stützpunkt-Mittelwertsfenster) abweichenden RR-Intervalle (25, 34).

Neben der Analyse der Zeitparameter konzentriert sich die vorliegende Studie aufgrund der bei Kurzzeitanalysen unzuverlässigen Erfassung des sehr niedrigen Frequenzbereichs („Very Low Frequency“, VLF: 0,02-0,04 Hz) (Task Force; 37) in erster Linie auf die Auswertung der Frequenzbänder „Low Frequency“ (LF: 0,04-0,15 Hz) und „High Frequency“ (HF: 0,15-0,4 Hz). Während LF primär die sympathische Aktivität repräsentiert, ist HF als Maß für die parasympathische (vagale) Aktivität des autonomen Nervensystems (ANS) anerkannt. Als „Globalmaß“ der Funktionsfähigkeit des ANS wurde die Total Power (TP) als Summe der Frequenzbänder VLF, LF und HF berechnet. Der sympathovagale Einfluss auf die Herz-tätigkeit wird durch das Verhältnis von hohen zu niedrigen Frequenzanteilen (LF/HF-Ratio) ausgedrückt. Eine Übersicht der ermittelten HRV-Parameter im Zeit- und Frequenzbereich gibt Tabelle 1.

Die Zeit- und Frequenzanalyse der synchron abgeleiteten RR-Tachogramme erfolgte mit den skizzierten Standardsoft-

wareapplikationen der beiden Hersteller (parametrisches AR-Modell (Polar), nichtparametrische FFT (VarCor)). Zusätzlich wurden die Leistungsdichtespektren mit einer auf Anfrage kostenlos zum Download verfügbaren Software (HRV Analysis 1,1) der Abteilung für Biomedizinische Signalanalyse (Prof. Dr. Karjalainen) der Universität Kuopio, Finnland (<http://venda.uku.fi/research/>

biosignal) berechnet. Die Software steht exemplarisch für eine Gruppe selbstentwickelter Anwendungen renommierter Forschungseinrichtungen (10, 34), die aufgrund massiv automatisierter oder unzureichend beschriebener Auswerterroutinen kommerzieller Anbieter dazu übergehen, wissenschaftlichen Ansprüchen genügende und den Richtlinien der Task Force (37) entsprechende Programme zu erstellen. Eine detaillierte Beschreibung der HRV Analysis Software 1,1 findet sich bei Niskanen et al. (27).

Aufgrund fehlender Exportfunktionen der Software VarCor PF5® muss sich die Untersuchung alternativer Auswertungsmöglichkeiten in der vorliegenden Studie auf die Analyse der artefaktbereinigten Datensätze des portablen Herzfrequenzmonitors Polar S810® begrenzen. Zum Erhalt einer äquidistanten Signalfolge wurden die Daten einer Spline-Interpolation mit einer Interpolationsrate von 2 Hz unterzogen. Die Berechnung der Spektralparameter erfolgte im Anschluss mittels FFT (Welch, 512 Pkte-Hanning Fensterung, 50 %

Tabelle 3: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der Frequenzparameter vor und nach Belastung für die Softwareapplikationen VarCor PF5®, Polar S810® und HRV Analysis 1,1 mit (Tb) und ohne (none) Trendeliminierung

	VarCor PF5®		Polar S810®		HRV 1,1 (Tb)		HRV 1,1 (none)	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>vor Belastung</b>								
LF [ms <sup>2</sup> ]	1314,89 ± 1099,92		2567,75 ± 1490,93		429,93 ± 471,18		2554,20 ± 1113,48	
HF [ms <sup>2</sup> ]	928,97 ± 912,55		884,73 ± 675,17		228,76 ± 219,90		672,53 ± 314,51	
TP [ms <sup>2</sup> ]	3372,34 ± 2740,76		6509,16 ± 2954,93		927,00 ± 917,36		6171,33 ± 1912,80	
LF/HF	2,49 ± 5,09		3,41 ± 2,27		4,12 ± 7,51		3,68 ± 1,32	
<b>nach Belastung</b>								
LF [ms <sup>2</sup> ]	124,65 ± 182,80		605,36 ± 329,12		44,00 ± 80,45		1030,36 ± 365,42	
HF [ms <sup>2</sup> ]	17,10 ± 23,30		148,97 ± 68,51		7,00 ± 9,17		246,50 ± 69,24	
TP [ms <sup>2</sup> ]	163,85 ± 218,96		1617,07 ± 856,65		68,89 ± 99,58		2667,11 ± 713,46	
LF/HF	6,05 ± 4,41		4,12 ± 0,96		6,98 ± 4,15		4,32 ± 0,43	

Overlap) (27). Die Frequenzbänder wurden mit und ohne Trendbereinigung des Signals analysiert. Zur Trendeliminierung wurde ein von Tarvainen et al. (36) für HRV-Analysen entwickeltes Verfahren herangezogen.

### Statistische Datenverarbeitung

Die statistische Aufarbeitung der Daten erfolgte mit dem Programm SPSS für Windows. Nach deskriptiver Auswertung und Prüfung auf Normalverteilung mittels Kolmogorov-Smirnov-Test wurden Rangkoeffizienten nach Spearman zur Überprüfung von Zusammenhängen eingesetzt. Die Testung auf Mittelwertsunterschiede erfolgte anhand von Wilcoxon-Tests für abhängige Stichproben. Als weiteres Maß für die Übereinstimmung der HRV-Parameter wurde das Vergleichbarkeitskriterium nach Bland & Altman (6) bestimmt.

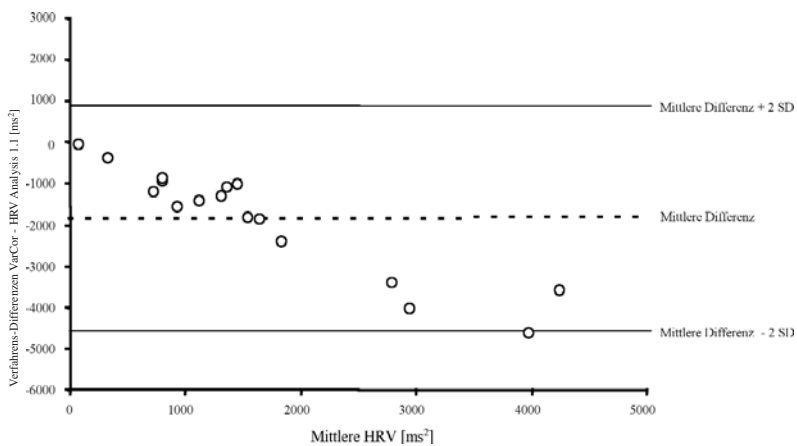


Abbildung 2: Übereinstimmungskriterium nach Bland & Altman (6) für VarCor PF5® und HRV Analysis 1,1 mit (Tb) Trendbereinigung: Total Power (TP) vor Belastung

Dieses vergleicht die mittlere Differenz zwischen Messungen in Relation zu ihrem Mittelwert. Das Kriterium gilt der Normalverteilung folgend als erfüllt, wenn 95 % der Differenzen kleiner als zwei Standardabweichungen sind. Für die Interpretation der Methodenvergleichbarkeit ist die Beurteilung

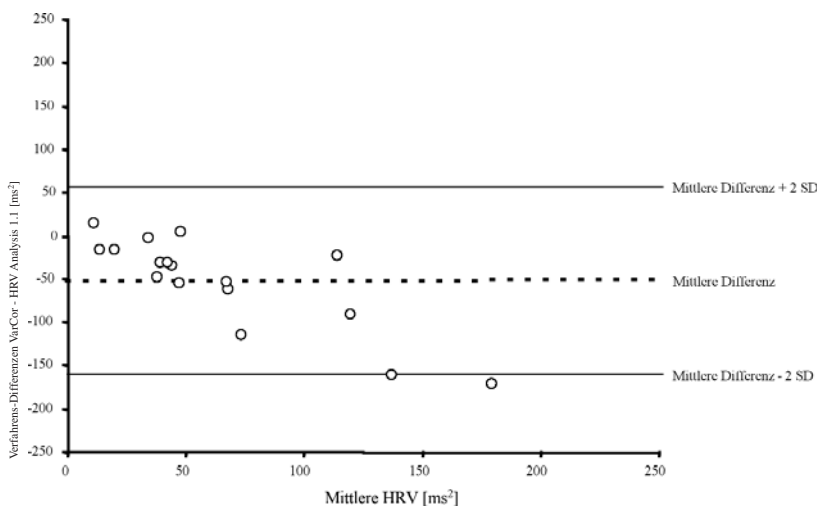


Abbildung 3: Übereinstimmungskriterium nach Bland & Altman (6) für VarCor PF5® und HRV Analysis 1,1 mit (Tb) Trendbereinigung: Total Power (TP) nach Belastung

der Distanz der Konformitätsgrenzen (mittlere Differenz  $\pm$  zwei Standardabweichungen) in Relation zu den Individualmesswerten entscheidend. Das Signifikanzniveau wurde auf kleiner 5 % angesetzt.

## Ergebnisse

Für die Zeitbereichsparameter zeigen sich mit Ausnahme von RRinter vor Belastung und RMSSD nach Belastung im Gruppenmittel keine signifikanten Unterschiede (Tab. 2). Die Korrelationsprüfung weist auf hohe lineare Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Synchronmessungen von VarCor PF5® und Polar S810® im Zeitbereich vor und nach Belastung hin.

Die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) für die ermittelten Frequenzparameter vor und nach Belastung gehen für die drei HRV-Analyseverfahren aus Tabelle 3 hervor.

Im Vergleich zu der als Referenzsystem dienenden Software HRV Analysis 1,1 zeigten die spektralen Verteilungsmesswerte der untersuchten Programme VarCor PF5® PC und Polar Precision Performance® 4,0 in Abhängigkeit der Trendeliminierung niedrige bis hohe Korrelationen (Tab. 4). Enge lineare Zusammenhänge auf hohem Signifikanzniveau konnten für den Vergleich von VarCor PF5® und der HRV Analysis Software 1.1 bei Trendbereinigung („Tb“) evaluiert werden. Mittlere bis hohe Korrelationen ergaben sich zwischen Polar S810® und HRV Analysis Software 1.1 ohne Trendeliminierung („none“). Lediglich niedrige bis mittlere Korrelationen zeigten sich zwischen VarCor PF5® und HRV Analysis Software 1,1 ohne Trendbereinigung (none) sowie zwischen Polar S810® und HRV Analysis Software 1,1 bei Grundschnungsbereinigung (Tb). In diesen Fällen konnten speziell für das Verhältnis von LF zu HF keine signifikanten Ergebniszusammenhänge identifiziert werden.

Das Vergleichbarkeitskriterium nach Bland & Altman (6; Abb. 2-5) weist anhand der durchschnittlichen Differenzwerte, deren Offset-Verschiebung und Trend auf systematische Unterschiede zwischen den Erhebungs- und Auswerteverfahren hin. Die graphische Darstellung verdeutlicht damit die in Tabelle 3 erkennbaren Verfahrensdifferenzen. Das Ausmaß system- und verfahrensspezifischer Unterschiede zeigt sich gleichwohl in der Distanz der Konformitätsgrenzen (MW $\pm$ SD, „limits of agreement“) in Relation zu den mittleren Individualmesswerten.

Exemplarisch sind die Bland & Altman-Plots für die mittleren Differenzen zwischen VarCor PF5® und HRV Analysis Software 1,1 mit Trendbereinigung (Tb) (Abb. 2, 3) sowie zwischen Polar S810® und HRV Analysis Software 1,1 ohne Trendbereinigung (none) (Abb. 4, 5) für die Total Power (TP) vor und nach Belastung dargestellt.

## Diskussion

Die Erfassung der HRV dient im Rahmen sportmedizinischer und sportwissenschaftlicher Fragestellungen v.a. dazu, die Adaptationsfähigkeit des Organismus als Ausdruck der individuellen kardialen Regulationsfähigkeit während und nach verschiedenen Beanspruchungen zu quantifizieren (2, 8, 9). Dabei ist die HRV-Analyse durch eine große Vielfalt eingesetzter Messsysteme und Auswerterroutinen gekennzeichnet, welche eine Interlaborvergleichbarkeit von Studienergebnissen in Frage stellen kann.



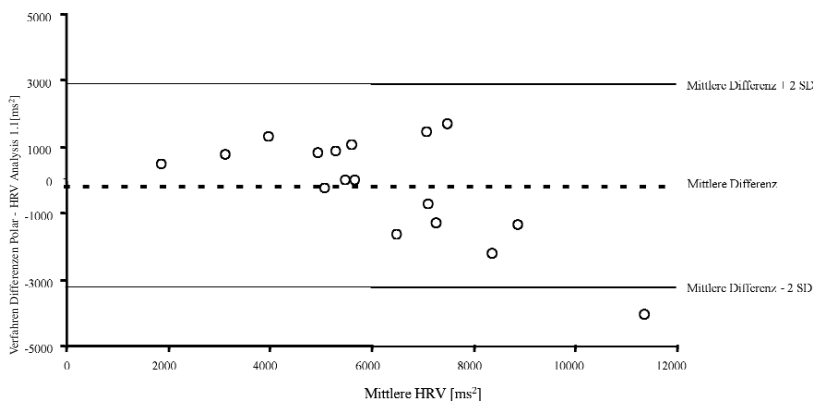


Abbildung 4: Übereinstimmungskriterium nach Bland & Altman (6) für Polar® und HRV Analysis 1,1 ohne (none) Trendbereinigung: Total Power (TP) vor Belastung

Für die Reproduzierbarkeit von Kurzzeitanalysen liegen bis dato divergierende Studienergebnisse vor. Während erste Untersuchungen von Pitzalis et al. (28) und Skyschally et al. (35) lediglich eine geringe Reliabilität nachweisen konnten, ermittelten Melanson (26) und Bigger et al. (5) eine hohe Reproduzierbarkeit für HRV-Messungen im Rahmen von Kurzzeitanalysen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Kreuzvalidierung belegen den hohen Übereinstimmungsgrad und eine damit ver-

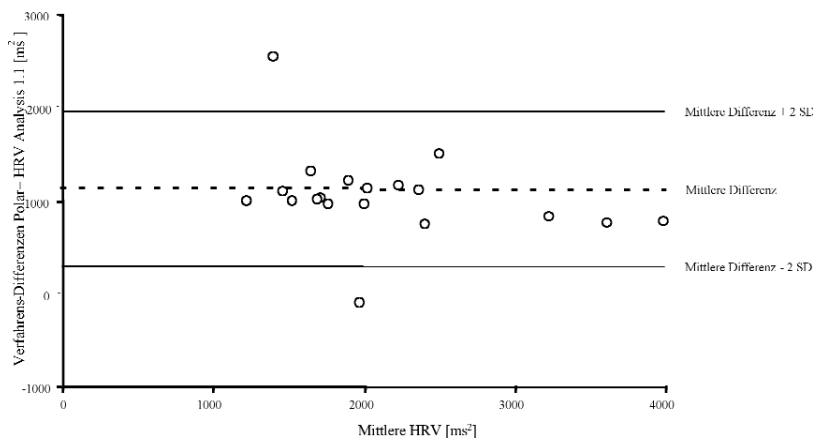


Abbildung 5: Übereinstimmungskriterium nach Bland & Altman (6) für Polar® und HRV Analysis 1,1 ohne (none) Trendbereinigung: Total Power (TP) nach Belastung

bundene Austauschbarkeit zeitbezogener Messergebnisse von HRV-Kurzzeitregistrierungen, weisen aber gleichzeitig die Existenz massiver system- und auswertespezifischer Unterschiede für die Kenngrößen des Leistungsdichtespektrums nach.

Die mit den Messinstrumenten VarCor PF5® und Polar S810® durchgeführten HRV-Messungen erwiesen sich mit beiden Systemen als praktikabel und für die Routineanwendung geeignet. Eine Überprüfung der Gütekriterien ist für den VarCor PF5® bisher nur anhand von Vorgängermodellen erfolgt. Die Ergebnisse von Howorka et al. (16) und Salinger et al. (31, 32) deuten darauf hin, dass die Messsysteme VariaCardio TF4® und VariaPulse TF3® (Sima Media, Olomouc, Tschechien) standardisierte, nichtinvasive, belastungsarme

und einfach durchführbare HRV-Messungen erlauben und eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse gewährleisten. Der in dieser Untersuchung eingesetzte VarCor PF5® unterscheidet sich nach Herstellerangaben bei identischer Software nur hinsichtlich einiger Modifikationen der Hardwarekomponenten von den genannten Vorgängermodellen. Die Ergebnisse bisheriger Validierungsstudien zu den Mini-Herzfrequenzmessern der Firma Polar® Elektro zeigen einerseits hohe Korrelationen für die Zeitbereichsparameter zwischen dem Messsystem Advantage Polar® und einem konventionellen EKG in Ruhe und während verschiedener Provokationstests. Für die Frequenzparameter ergaben sich trotz hoher Korrelationen system-

immanente Unterschiede (23). Eine jüngste zweigeteilte Studie unterstreicht die hohe Messgenauigkeit der HRV-Analysen mittels Polar S810® unter standardisierten Laborbedingungen im Vergleich mit medizinischen Standard-EKG-Systemen für alle relevanten Zeit- und Frequenzparameter (22). Für die zeitbezogene Analyse von RR-Tachogrammen bestätigen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung diese Resultate. Die Messungen vor und nach standardisierter Belastung zeigen, dass trotz systemimmanenter Unterschiede beide Messsysteme zur validen Erfassung von beanspruchungsinduzierten Anpassungsreaktionen dienen können. Die Zusammenhangsanalyse lässt im weiteren einen Vergleich der Ergebnisse im Bereich der Zeitparameter als zulässig erscheinen. Aufgrund der Tatsache, dass der S810® keine parallele EKG-Registrierung ermöglicht, empfiehlt sich für den routinemäßigen Einsatz im Rahmen sportmedizinischer Fragestellungen die HRV-Messung im Anschluss an ein Ruhe-EKG oder die simultane EKG-Registrierung während der Messungen zum Ausschluss von Artefakten und/oder kardialen Erkrankungen mit Einfluss auf die HRV.

Allerdings besitzen die Zeitbereichsparameter aufgrund der geringeren Stationarität der Herzfrequenzmodulationen bei Kurzaufzeichnungen ihre Aussagekraft primär bei Langzeitanalysen. Zur Bewertung der individuellen autonomen Regulation im Rahmen von Kurzzeitanalysen eignen sich in erster Linie Frequenzparameter sowie gegebenenfalls zweidimensionale Streudiagramme (Pointcaré Plots) zur geometrischen HRV-Analyse (37). Die vorliegenden Vergleichsergebnisse der Spektralberechnungen spiegeln jedoch die deutlichen Unterschiede in den Messwerten zur Quantifizierung sympathovagaler Modulation in divergierenden Belastungszuständen wider. Wenngleich die ermittelten Korrelationskoeffizienten zwischen VarCor® und der HRV Analysis Software 1,1 bei Verwendung eines Trendbereinigungsverfahrens (36) für alle Parameter der Frequenzdomäne auf einen hohen linearen Zusammenhang hindeuten, weist das Vergleichbarkeitskrite-

rium nach Bland & Altman (6) auf systematische Unterschiede zwischen den Erhebungs- und Auswerteverfahren

Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten für die Vergleiche der Messsysteme vor (1) und nach (2) Belastung (\*\* =  $p < 0,01$ ; \* =  $p < 0,05$ ; mit „Tb“ und ohne „none“ Trendeliminierung)

	VarCor PF5® HRV 1,1 (Tb)	VarCor PF5® HRV 1,1 (none)	Polar S810® HRV 1,1 (Tb)	Polar S810® HRV 1,1 (none)
	RK Spearman	RK Spearman	RK Spearman	RK Spearman
LF (1)	$r = 0,904^{**}$	$r = 0,602^*$	$r = 0,841^{**}$	$r = 0,892^{**}$
LF (2)	$r = 0,935^{**}$	$r = 0,604^{**}$	$r = 0,727^{**}$	$r = 0,591^{**}$
HF (1)	$r = 0,938^{**}$	$r = 0,900^{**}$	$r = 0,822^{**}$	$r = 0,937^{**}$
HF (2)	$r = 0,915^{**}$	$r = 0,690^{**}$	$r = 0,644^{**}$	$r = 0,644^{**}$
TP (1)	$r = 0,937^{**}$	$r = 0,563^*$	$r = 0,625^*$	$r = 0,873^{**}$
TP (2)	$r = 0,970^{**}$	$r = 0,820^{**}$	$r = 0,766^{**}$	$r = 0,825^{**}$
LF/HF (1)	$r = 0,945^{**}$	$r = 0,138$	$r = 0,301$	$r = 0,773^{**}$
LF/HF (2)	$r = 0,888^{**}$	$r = 0,262$	$r = 0,412$	$r = 0,556^*$

hin. Eine Austauschbarkeit der Messergebnisse scheint demzufolge nicht statthaft. Das Ausmaß linearer Zusammenhänge zwischen den Leistungsspektren der VarCor PF5® PC und der HRV Analysis Software 1,1 erklärt sich u.a. aus der identischen spektralanalytischen Auswerteroutine (FFT). Obgleich Trendeliminierungsverfahren primär die sehr niederfrequenten Spektralanteile (VLF) beeinflussen, lässt der Vergleich der Frequenzergebnisse des grundschwingungs bereinigten Polar-Tachograms mit den Resultaten der Software VarCor PF5® PC einen Einfluss des Verfahrens im Bereich des Leistungsdichtespektrums von 0,04 – 0,15 Hz erkennen. Die Ergebnisse lassen weiterhin vermuten, dass auch die Software des VarCor PF5® eine Trendbereinigung im Vorfeld der Datenanalyse vollzieht. Diese Folgerung wird durch das Resultat der insgesamt geringeren Korrelationen für den Vergleich zwischen VarCor® und HRV Analysis Software 1,1 ohne Trendbereinigung unterstützt. Im Gegensatz dazu zeigt der Vergleich der Softwareapplikationen von Polar® und HRV Analysis 1,1 ohne Trendbereinigung vergleichsweise höhere Korrelationskoeffizienten. Dieses Resultat steht in guter Übereinstimmung mit aktuellen Ergebnissen von Hoos et al. (13). Die Autoren zeigten in ihrer vergleichenden Studie frequenzanalytischer Verfahren der HRV mittlere bis sehr hohe lineare Zusammenhänge unterschiedlicher spektralanalytischer Verfahren (FFT, AR), wobei die Prüfung auf Übereinstimmung der Messmethoden nach Bland & Altman (6) ebenfalls belegte, dass die Verfahrensergebnisse nicht austauschbar sind.

Aus methodischer Sicht bleibt anzumerken, dass die Datenerhebung mittels Polar S810® und VarCor PF5® zwar stets simultan erfolgte, dass aber geringfügige Abweichungen der Messzeiträume aufgrund des manuellen Starts der Datenspeicherung nicht vollständig auszuschließen sind. Diese wenn auch geringfügigen Divergenzen stellen eine Limitation der vorliegenden Untersuchung dar und müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Gleichzeitig rechtfertigen die in dieser Studie erzielten Ergebnisse den vermehrten Einsatz (3, 7, 15, 17, 39) herkömmlicher Mini-Herzfrequenzmesser in Verbindung mit eigenen richtlinienkonformen Softwareapplikationen zur

HRV-Analyse. Mit der HRV Analysis Software 1,1 wurde eine Auswerteroutine für HRV-Rohdaten nach den Richtlinien der Task Force (37) entwickelt. Die Software ermöglicht die rasche Auswertung und (Re)Analyse von Rohdatensätzen unterschiedlicher datenexportfähiger Messsysteme und bietet eine benutzerdefinierte Evaluation der autonomen Regulation in verschiedenen Beanspruchungssituationen. Sie kann zu einer wünschenswerten Vereinheitlichung von Auswertestandards im Bereich der HRV-Analyse beitragen. Bei kommerziellen Anbietern sollte anstelle unüblicher Messgrößendarstellungen und der Programmierung systemspezifischer Auswerteroutinen mit fragwürdigen Alleinstellungsmerkmalen die Vergleichbarkeit von Messwerten und die Mitarbeit bei der Entwicklung einheitlicher Standards im Vordergrund stehen. Detaillierte Produktinformationen hinsichtlich der verwendeten Analyse-kriterien wie Trendbereinigungsverfahren, Erkennungsschwellen oder Imputationsverfahren von Seiten der Hersteller sind insbesondere im Rahmen wissenschaftlicher Fragestellungen zwingend erforderlich.

## Schlussfolgerung

Vor dem Hintergrund der sehr guten Korrelationen zwischen den Messgeräten der Fa. Pantalus und Polar Electro für die Zeitparameter und in Anbetracht der guten bis sehr guten Korrelationen zwischen dem VarCor PF5® und der HRV Analysis Software 1,1 (mit Trendbereinigung) für die Parameter der Frequenzdomäne vor und nach Belastung erscheint die Erhebung der HRV mittels kostengünstiger und einfach handhabbarer Mini-Herzfrequenzmesser und die alternative Datenauswertung nach den Richtlinien der Task Force (37) als zuverlässig und ökonomisch.

Unter Voraussetzung einer routinemäßigen EKG-Registrierung vor bzw. während der Datenerfassung, könnte der Einsatz von richtlinienkonformen Software-Applikationen einen wesentlichen Beitrag zur Standardisierung der Erhebungs- und Analysemethoden der HRV leisten. Die Vereinheitlichung der HRV-Analyse sollte künftig im Mittelpunkt weiterer multidisziplinärer Bemühungen stehen.

## Literatur

1. Agelink MW: Herzfrequenzvariabilität. Richtlinien zur Qualitätssicherung. Deutsches Ärzteblatt 96 (1999) A3183.
2. Aubert AE, Seps B, Beckers F: Heart rate variability in athletes. Sports Med 33 (2003) 889-919.
3. Berball A, Neumann G: Leistungsdiagnostische Wertigkeit der Herzfrequenzvariabilität bei der Fahrradergometrie, in: Hottenrott K (Hrsg): Herzfrequenzvariabilität im Sport. Prävention – Rehabilitation – Training. Czwalina, Hamburg, 2002, 27-40.
4. Baumert JH, Frey AW, Monika A: Analysis of heart rate variability. Background, methods, and possible use in anaesthesia. Anästhesist 44 (1995) 677-686.
5. Bigger T, Fleiss JL, Rolnitzky LM, Steinman RC: Stability over time of heart period variability in patients with previous myocardial infarction and ventricular arrhythmias. Am J Cardiol 69 (1992) 718-723.
6. Bland JM, Altman DG: Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. Lancet 8 (1986) 307-310.

7. *Böhm U, Hottenrott K, Sommer HM*: Bestimmbarkeit individueller Trainingszonen auf der Basis der Herzfrequenzvariabilität, in: Hottenrott K (Hrsg): Herzfrequenzvariabilität im Sport. Prävention – Rehabilitation – Training. Czwalina, Hamburg, 2002, 55-66.
8. *Carter JB, Banister EW, Blaber AP*: Effect of Endurance Exercise on Autonomic Control of Heart Rate. *Sports Med* 33 (2003) 33-46.
9. *Dickhuth HH, Niess AM, Röcker K, Heitkamp HC*: Die Bedeutung der körperlichen Aktivität für die physiologische Streßreaktion. *Z Kardiol* 88 (1999) 305-314.
10. *Fromme A, Geschwinde C, Mooren F, Thorwesten L, Völker K*: Auswirkungen eines zehnwöchigen Ausdauertrainings auf die Herzfrequenzvariabilität bei Laufeinsteigern, in: Hottenrott K (Hrsg): Herzfrequenzvariabilität im Sport. Prävention – Rehabilitation – Training. Czwalina, Hamburg, 2002, 89-94.
11. *Haas J, Liebrich A, Himmrich E, Treese N*: Kurzzeitmessung der Herzfrequenzvariabilität bei Postinfarktpatienten – Methodik, Reproduzierbarkeit und Stellenwert im Rahmen der Postinfarktdiagnose. *Herzschr Elektrophys* 11 (2000) 102-109.
12. *Hon EH, Lee ST*: Electronic evaluations of the fetal heart rate patterns preceding fetal death: further observations. *Am J Obstet Gynecol* 87 (1965) 814-826.
13. *Hoos O, Jacobi P, Hottenrott K, Sommer HM*: Vergleichende Untersuchung frequenzanalytischer Verfahren der Herzfrequenzvariabilität (HRV). DVS Kommission Gesundheit (Jahrestagung): Assessmentverfahren in Gesundheitssport und Bewegungstherapie – Messen, Testen, Beurteilen, Bewerten. Saarbrücken, 23.-24.9.2004, 45.
14. *Hottenrott K*: Grundlagen der Herzfrequenzvariabilität und Anwendungsmöglichkeiten im Sport, in: Hottenrott K (Hrsg): Herzfrequenzvariabilität im Sport. Prävention – Rehabilitation – Training. Czwalina, Hamburg, 2002, 9-26.
15. *Hottenrott K, Lauenroth A, Schwesig R*: Einfluss körperlicher Aktivität auf die Herzfrequenzvariabilität bei über 60jährigen. DVS Kommission Gesundheit (Jahrestagung): Assessmentverfahren in Gesundheitssport und Bewegungstherapie – Messen, Testen, Beurteilen, Bewerten. Saarbrücken, 23.-24.9.2004, 48.
16. *Howorka K, Pumpřla J, Schabmann A*: Optimal parameters of short-term heart rate spectrogram for routine evaluation of diabetic cardiovascular autonomic neuropathy. *J Autonomic Nervous System* 69 (1998) 164-172.
17. *Janshoff G, Mück H, Mück-Weymann M*: Einfluss von Dehnung („Stretching“) auf die autonome Herzfunktion, in: Hottenrott K (Hrsg): Herzfrequenzvariabilität im Sport. Prävention – Rehabilitation – Training. Czwalina, Hamburg, 2002, 131-140.
18. *Jung J, Heisel A, Tscholl D, Fries R, Schieffer H, Özbek C*: Assessment of heart rate variability by using different commercially available systems. *Am J Cardiol* 78 (1996) 118-120.
19. *Klingenheben T, Zabel M, Hohnloser SH*: Kurzzeitanalyse der Herzfrequenzvariabilität im Zeitbereich zur Prognosebeurteilung nach Myokardinfarkt: methodologisch sinnvolle Alternative zum Langzeit-EKG? *Z Kardiol* 87 (1998) 128-133.
20. *König BO, Schumacher YO, Schmidt-Trucksäss A, Berg A*: Herzfrequenzvariabilität – Schon reif für die Praxis? *Leistungssport* 3 (2003) 4-9.
21. *Löllgen H*: Herzfrequenzvariabilität. *Dt Ärztbl* 31/32 (1999) 2029-2032.
22. *Löllgen D, Jung K, Mück-Weymann M*: Methodische Überlegungen zur vergleichenden Messung mittels Polar® S810 und Standardmethoden der Medizin, in: Hottenrott K (Hrsg): Herzfrequenzvariabilität im Fitness- und Gesundheitssport. Czwalina, Hamburg, 2004, 121-136.
23. *Mahlke C, Rauh R, Bauer RD, Mück-Weymann M*: Validierung des Polar® Advantage für die standardisierte Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität, in: Hottenrott K (Hrsg): Herzfrequenzvariabilität im Sport. Prävention – Rehabilitation – Training (S.). Czwalina, Hamburg, 2001, 177-188.
24. *Manthei U, Cammann H, Eckoldt K*: Zum Wert der Spektralanalyse von Herzperiodendauern bei Patienten mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen. *Herz/Kreislauf* 28 (1996) 20-23.
25. *Meesmann M, Bosse J, Scharf R*: Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität. *Herzschr Elektrophys* 2 (1994) 5-29.
26. *Melanson EL*: Resting heart rate in men varying in habitual physical activity. *Med Sci Sports Exerc* 32 (2000) 1894-1901.
27. *Niskanen JP, Tarvainen MP, Ranta-aho PO, Karjalainen PA*: Software for advanced HRV analysis. University of Kuopio, Department of Applied Physics Report Series (2002), Zugriff am 1.10.04 unter <http://www.it.uku.fi/biosignal/pdf/HRVdeprep.pdf>.
28. *Pitzalis MV, Mastropasqua M, Massari F, Forleo C, DiMaggio M, Passantino A, Colombo R, DiBiase M, Rizzon P*: Short- and longterm reproducibility of time and frequency domain heart rate variability measures in normal subjects. *Cardiovasc Res* 32 (1996) 226-233.
29. *Przibille O, Liebrich A, Nowak B, Rosocha S, Zellerhoff C, Geil S, Himmrich E, Treese N, Meyer J*: Kardiomyopathie: Die prognostische Bedeutung der Herzfrequenzvariabilitätsanalyse bei Patienten mit dilatativer Kardiomyopathie. *Z Kardiol* 87 (1998) 453-458.
30. *Ruha A, Sallinen S, Nissila S*: A real-time microprocessor QRS detector system with a 1-ms timing accuracy for the measurement of ambulatory HRV. *IEEE Trans Biomed Eng* 44 (1997) 159-167.
31. *Salinger J, Vychodil R, Novotny J, Pumpřla J, Opavsky J, Stejskal P, Vaverka F, Bula J*: Telemetric, computeraided system for non-invasive examination of heart rate variability, type VariaPulse TF3. *Computers in Cardiology, IEEE* (1995) 437-440.
32. *Salinger J, Pumpřla J, Vychodil R, Stejskal P, Opavsky J, Novotny J*: Microcomputer System for Telemetric Assessment of Short-term Heart Rate Variability in Time and Frequency Domain, Type VariaCardio TF4. 1st virtual Congress of Cardiology, 2000, <http://www.fac.org.ar/cvirtual/tlibres3/tnn2607i.htm#tope>.
33. *Schmidt HB, Heinroth KM, Müller-Werdan U, Kuhn C, Werdan K*: Die autonome Dysfunktion des Intensivpatienten – ein Überblick. *Intensivmed Notfallmed* 37 (2000) 7-18.
34. *Schulz H, Horn A, Senge P, Heck H*: Intraindividuelle Variabilität von Parametern der Herzfrequenzvariabilität, in: Hottenrott K (Hrsg): Herzfrequenzvariabilität im Sport. Prävention – Rehabilitation – Training. Czwalina, Hamburg, 2002, 169-175.
35. *Skyschally A, Breuer HWM, Heusch G*: The analysis of heart rate variability does not provide a reliable measurement of cardiac sympathetic activity. *Clin Sci* 91 (1996) 102-104.
36. *Tarvainen MP, Ranta-aho PO, Karjalainen PA*: An advanced detrending method with application to HRV analysis. *IEEE Trans Biomed Eng* 49 (2002) 172-175.
37. *Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology*: Heart Rate Variability. Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use. *Circulation* 93 (1996) 1043-1065.
38. *Tsuji H, Larson MG, Venditti FJH, Manders ES*: Impact of reduced heart rate variability on risk for cardiac events. The Framingham Heart Study. *Circulation* 94 (1996) 2850-2855.
39. *Vestweber K, Hottenrott K*: Einfluss einer speziellen Entspannungs- und Konzentrationstechnik (Freeze-Frame®) auf Parameter der Herzfrequenzvariabilität, in: Hottenrott K (Hrsg): Herzfrequenzvariabilität im Sport. Prävention Rehabilitation – Training. Czwalina, Hamburg, 2002, 141-156.

Korrespondenzadresse:

MA Sportwiss. Meike Bürklein  
Johann Wolfgang Goethe-Universität  
Institut für Sportwissenschaften  
Abteilung Sportmedizin  
Ginnheimer Landstr. 39  
60487 Frankfurt/M.

E-mail: [buerklein@sport.uni-frankfurt.de](mailto:buerklein@sport.uni-frankfurt.de)